

УДК 62-83:621.77

Е. С. Руднев, канд. техн. наук,
Д. И. Морозов, канд. техн. наук

μ-СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Аннотация. Приведен μ-синтез робастной системы управления на примере синхронного электропривода, функционирующей в условиях неполной информации об объекте и с учетом его неопределенностей параметрического типа. Изложен материал μ-анализа, суть которого заключается в нахождении максимально возможного значения структурного сингулярного числа μ для данной системы. Синтезированный μ-регулятор обеспечивает робастную устойчивость и качество для всех допустимых неопределенностей объекта.

Ключевые слова: синхронный электропривод, μ-синтез и анализ, М-Δ конфигурация, H_∞ -оптимизация, структурная неопределенность, робастное качество, сингулярное число.

Е. С. Руднев, канд. техн. наук,
Д. И. Морозов, канд. техн. наук

μ-СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Анотація. Наведено μ-синтез робастної системи керування на прикладі синхронного електроприводу, що функціонує в умовах неповної інформації про об'єкт і з урахуванням його невизначених параметричного типу. Викладено матеріал μ-аналізу, суть якого полягає в знаходженні максимально можливого значення структурного сингулярного числа μ для даної системи. Синтезований μ-регулятор забезпечує робастну стійкість та якість для всіх допустимих невизначеностей об'єкта.

Ключові слова: синхронний електропривод, μ-синтез та аналіз, М-Δ конфігурація, H_∞ -оптимізація, структурна невизначеність, робастна якість, сингулярне число.

Е. Rudnev, PhD,
D. Morozov, PhD

μ- SYNTHESIS OF ROBUST SPEED CONTROLLER OF SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES

Abstract. Presents a μ-synthesis robust control system on the example of synchronous electric drives, which functions under incomplete information about the plant and subject of his uncertain parametric type. The paper also contains the material μ-analysis, the essence of which is to find the maximum possible value of structured singular value μ for a given system. The μ-controller are synthesized, that ensure robust stability and performance for all possible uncertainties of the plant.

Keywords: synchronous electric drive, μ-synthesis and analysis, M-Δ configuration, H_∞ -optimization, structural uncertainty, robust performance, singular value.

Введение. Материал, приведенный в статье описывает один из методов робастного управления, называемым μ-синтезом, цель которого заключается в том, чтобы найти стабилизирующий регулятор, обеспечивающий замкнутой САР абсолютное робастное качество и робастную устойчивость не только для «номинального» объекта, но и для любого объекта, принадлежащего множеству «возмущенных» объектов, определяемых классом неопределенности. Важность синтеза такого регулятора обусловлена прежде всего тем, что практически в любой инженерной задаче проектирования системы

управления присутствует неопределенность (или ошибка) в модели объекта (математическая модель объекта, полученная на основе теории или в результате идентификации, отличается от реальной технической системы) и в знании класса входных возмущений.

Основная и принципиально новая единая схема, которая обобщает анализ робастной устойчивости при разнообразных типах неопределенности, называется μ-анализом, поскольку в ее основу положено понятие так называемого структурного сингулярного числа матрицы, обозначаемого μ.

Интерес к синтезу робастных регуляторов связан с потребностями в снижении необходимого объема информации об объектах управления, стремлением к универсальности управляющих систем и сокращению затрат на их наладку. Следует признать, что, несмотря на серьезные теоретические достижения, в том числе и в области автоматизированного электропривода, методы H_∞ -оптимизации не вошли в повседневную отечественную практику. Это объясняется доминированием на рынке комплектных электроприводов с «классическими» алгоритмами управления.

Анализ предыдущих исследований.

Многие работы, развивающие направление робастного управления (H_∞ -теория), вводят понятие структурного сингулярного числа матрицы μ , которое лежит в основе μ -анализа систем управления. Для вычисления μ существуют численные методы [1, 2].

Структурно сингулярное число позволяет дать оценку проектируемой системе управления (критерий робастной устойчивости), которая называется μ -анализом [3-5]. Целью μ -синтеза является поиск регулятора, сингулярное число которого для каждой частоты $\omega \in [0, \infty]$ удовлетворяет условию

$$\mu(\mathbf{F}_L(\mathbf{G}(j\omega), \mathbf{K}(j\omega))) \leq 1. \text{ Выполнение этого условия обеспечит робастное качество замкнутой системе. Также решена проблема оптимизации: поиск наименьшего верхнего предела } \mu\text{-значений осуществляется посредством итерационного процесса, называемым робастным } D\text{-разбиением [6, 7].}$$

Цель работы. Разработка робастной САР синхронного электропривода с μ -регулятором скорости, функционирующей в условиях неполной информации о объекте управления и с учетом его неопределенностей, а также исследование робастных характеристик качества с помощью μ -анализа на основе структурного сингулярного числа.

Материал и результаты исследования.

μ -анализ и робастное качество. Все системы с неопределенной динамикой могут быть преобразованы к общему виду, называемому M - Δ конфигурацией (рис. 1), то есть предполагается, что структура системы, со-

держащей объект управления, регулятор, обратные связи, неопределенности, может быть преобразована к общему виду. В основу μ -синтеза положено понятие так называемого структурного сингулярного числа матрицы, обозначаемого μ [1, 2, 4].

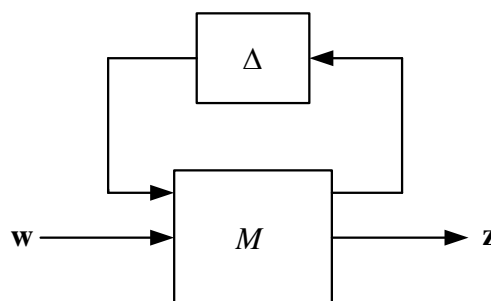


Рис. 1. M - Δ конфигурация

На рис.1 M – номинальная система (предполагающаяся устойчивой), а Δ – все, относящееся к неопределенности. При этом предполагается, что матрица $\Delta(s)$, задающая неопределенность, имеет специальную структуру, которая будет описана позже. В качестве допустимых возмущений рассматриваются устойчивые $\Delta(s)$, сохраняющие эту структуру и ограниченные H_∞ -нормой:

$$\|\Delta(s)\|_\infty = \sup_\omega \|\Delta(j\omega)\| \leq \gamma. \quad (1)$$

Здесь интересует верхняя грань тех γ , при которых сохраняется робастная устойчивость системы при описанных возмущениях. Поскольку система устойчива, если матрица $(I + M(s)\Delta(s))^{-1}$ существует при $\text{Re } s \leq 0$, то задача сводится к проверке условия

$$\det(I + M(s)\Delta(s)) \neq 0 \quad (2)$$

при всех допустимых $\Delta(s)$ и всех $s: \text{Re } s \leq 0$ (достаточно проверять значения s , лежащие на границе левой полуплоскости, то есть $s = j\omega$). Условие

$$\det(I + M(j\omega)\Delta(j\omega)) \neq 0 \quad \forall \omega \quad (3)$$

можно проверить «по-точечно», меняя ω . для каждой частоты $\omega \in [0, \infty]$. Поэтому необходимо для постоянных матриц M и Δ проверить следующие условие:

$$\det(I + M(j\omega)\Delta(j\omega)) \neq 0 \quad \forall \Delta: \|\Delta\| \leq 1, \quad (4)$$

Δ имеют блочно-диагональный вид.

Выражение для численного нахождения $\mu(M)$ [6, 7]:

$$\sup_{U \in U} \rho(UM) = \mu(M) \leq \inf_{D \in D} \|DMD^{-1}\| \quad (5)$$

где M - постоянная квадратная матрица с комплексными элементами; $\rho(M)$ - спектральный радиус матрицы M ; $U = \{U \in \Delta: UU^* = I\}$ - множество унитарных матриц той же структуры, что и Δ .

Для μ можно получить верхние и нижние границы, используя линейные преобразования из U и D . Минимизация по D в правой части (5) – сравнительно простая задача (она может быть сведена к выпуклой оптимизации). В общем случае верхняя и нижняя границы для μ различаются. Особенно трудно вычисление μ для вещественных блоков, которые соответствуют параметрическим неопределенностям. В системе MATLAB существует специальный пакет Robust Control Toolbox, где собраны алгоритмы вычисления μ и его использования для анализа робастной устойчивости.

Критерий робастной устойчивости. Рассматриваемая система устойчива при всех допустимых Δ , $\|\Delta(s)\|_\infty < \gamma$, тогда и только тогда, когда

$$\sup_{\omega \geq 0} \mu(M(j\omega)) \leq \frac{1}{\gamma}. \quad (6)$$

Критерий робастной устойчивости (6) предполагает выполнение следующих операций: система приводится к M - Δ конфигурации; для каждого ω вычисляется $\mu(M(j\omega))$; проверяется условие (6).

μ -синтез методом D-K итераций. Именно выражение (6) дает необходимое и

достаточное условие робастной устойчивости системы, имеющей M - Δ конфигурацию (рис. 1), в терминах структурного сингулярного числа $\mu(M)$.

Теперь необходимо решить задачу выбора регулятора K , который обеспечивает выполнение условия (6). $M(s)$ соответствует матричной передаточной функции (МПФ) системы, изображенной на рис. 2.

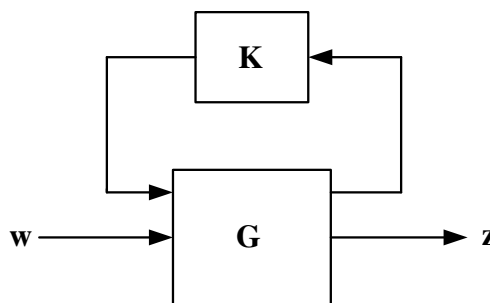


Рис. 2. M - Δ конфигурация для задачи μ -синтеза

Здесь G - объект управления, который удобно представить в виде блочной матрицы

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

а K - регулятор; тогда

$$M = G_{11} + G_{12}K(I - G_{22}K)^{-1}G_{21} = F_L(G, K), \quad (8)$$

где F_L обозначает нижнее дробно-линейное преобразование [8, 9]. Задача свелась к выбору регулятора K , обеспечивающего выполнения условия

$$\mu(F_L(G, K)) \leq \frac{1}{\gamma}, \quad (9)$$

а задача о максимальной робастности (то есть о нахождении наибольшего γ , для которого можно обеспечить робастную устойчивость) – к минимизации $\mu(F_L(G, K))$ по K :

$$\min_{\mathbf{K}} \mu(\mathbf{F}_L(\mathbf{G}, \mathbf{K})). \quad (10)$$

К сожалению, прямые методы решения этой задачи неизвестны, и используется косвенный путь, не всегда гарантирующий нахождение решение. Но для μ известна верхняя граница (5):

$$\mu(M) \leq \inf_{D \in \mathbb{D}} \|DMD^{-1}\|, \quad (11)$$

где D - блочно-диагональные матрицы той же структуры, что и Δ . При фиксированном D задача минимизации по \mathbf{K} :

$$\min_{\mathbf{K}} \|DF_L(\mathbf{G}, \mathbf{K})D^{-1}\|_{\infty} \quad (12)$$

- это стандартная задача H_{∞} -оптимизации, и для ее решения существуют хорошо разработанные методы (использующие переход к пространству состояний и уравнений Риккати). С другой стороны, при фиксированном \mathbf{K} и ω решение задачи

$$\min_{D \in \mathbb{D}} \|DMD^{-1}\|, \quad (13)$$

$$M = M(j\omega) = \mathbf{F}_L(\mathbf{G}(j\omega), \mathbf{K}(j\omega))$$

может быть сведено к выпуклой конечномерной задаче оптимизации, для которой известны эффективные методы. Таким образом, в общих чертах метод решения задачи μ -синтеза, называемый D-K итерациями, имеет следующий вид.

D-итерации: для найденного приближения \mathbf{K} на всем частотном диапазоне $0 < \omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_N$ с помощью методов выпуклой минимизации решаются задачи

$$\min_{D \in \mathbb{D}} \|DM_i D^{-1}\|, \quad M_i = M(j\omega_i), \quad (14)$$

$$i = 1, \dots, N$$

Решения которых обозначается через D_i . Затем находится функция $D(s) \in RH_{\infty}$, $D \in \mathbb{D}$, которая хорошо аппроксимирует найденные решения на всем частотном диа-

пазоне $\omega_i : D(j\omega_i) \approx D_i$.

2. K-итерации: для найденного $D(s)$ методами H_{∞} -оптимизации решается задача (13) и находится очередное приближение для регулятора \mathbf{K} , после чего переходят к пункту 1. Пока не будет найден регулятор \mathbf{K} такой, сингулярное число которого для каждой частоты $\omega \in [0, \infty]$ удовлетворяет условию $\mu(\mathbf{F}_L(\mathbf{G}(j\omega), \mathbf{K}(j\omega))) \leq 1$, что соответствует $\mu(M(j\omega)) \leq 1$. Выполнение этого условия обеспечит робастное качество замкнутой системе.

Порядок синтезированного μ -регулятора обычно высок, следовательно, необходимы алгоритмы для его редуцирования. Эффективные методы редуцирования реализованы в пакете H-infinity and Mu Synthesis в системе MATLAB и успешно применяются для решения практических инженерных задач.

μ -синтез регулятора скорости синхронного электропривода методом D-K итераций. Математическое описание объекта управления – синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), создание обобщенного объекта и модели ОУ матрицы \mathbf{G} , а также описание неопределенностей приведено в [9-11].

Выражение электромагнитного момента СДПМ в системе координат ротора [9-11]:

$$M_s = \frac{3}{2} p_0 (\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (15)$$

Выбирая $(i_d, i_q, \theta_{rm}, \omega_{rm})$ как переменные состояния, получим систему дифференциальных уравнений, описывающую синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов на роторе:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{3p_0\Psi_f}{2J} i_q + \frac{3p_0}{2J} (L_d - L_q) i_d i_q - \frac{1}{J} M_{\text{мех}}; \\ \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + p_0\omega_{rm} \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_d} u_d; \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - p_0\omega_{rm} \frac{L_d}{L_q} i_d - p_0\omega_{rm} \frac{\Psi_f}{L_q} + \frac{1}{L_q} u_q. \end{cases}$$

где $u_d, u_q, i_d, i_q, \Psi_d, \Psi_q$ - напряжения, токи и потокосцепления в системе координат ротора; R_s - активное сопротивление обмотки статора, Ом; L_d и L_q - полные индуктивности продольной d и поперечной q осей, Гн; Ψ_f - потокосцепление постоянных магнитов на роторе; p_0 - число пар полюсов машины; ω_{rm} - механическая угловая частота вращения ротора, рад/с; J - момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу машины, кг·м²;

При синтезе использовались весовые функции:

$$W_S = \frac{s/M + \omega_0}{s + \omega_0 A}; \quad W_T = \frac{s + \omega_0/M}{As + \omega_0} \quad (17)$$

где $A = 0,001$ – желаемая максимально допустимая установившаяся ошибка; $\omega_0 = 200$ – желаемая полоса пропускания; $M = 3$ – пик чувствительности.

Замкнутая МПФ $T = F_L(P, K)$ от входа возмущения w до контролируемой переменной z :

$$\begin{bmatrix} z_1(s) \\ z_2(s) \\ z_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_S(s)S(s) \\ W_R(s)R(s) \\ W_T(s)T(s) \end{bmatrix} r(s), \quad (18)$$

где $S(s) = (I + G(s)K(s))^{-1}$ - функция чувствительности;

$R(s) = K(s)(I + G(s)K(s))^{-1}$ - матричная передаточная функция чувствительности управления;

$$T(s) = G(s)K(s)(I + G(s)K(s))^{-1}$$

- дополнительная функцией чувствительности.

Заметим, что МПФ замкнутой системы T устанавливает связь между выходом системы и входом сигнала задания. Функция чувствительности S описывает выход как

функцию входа возмущения. Она также определяет реакцию ошибки слежения на сигнал задания, то есть. S является передаточной функцией по ошибке.

Обобщенный объект $P(s)$:

$$P(s) = \begin{bmatrix} W_S & -W_S G \\ 0 & W_R \\ 0 & W_T G \\ I & -G \end{bmatrix} \quad (19)$$

Результаты итерационного процесса при синтезе μ -регулятора скорости синхронного электропривода в системе MATLAB приведены на рис. 3.

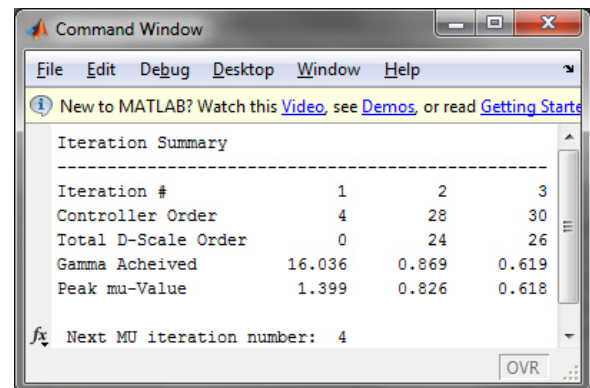


Рис. 3. Результаты итерационного процесса

По результатам синтеза (рис. 3) видно, что после третьей итерации H_∞ -норма замкнутой системы (Gamma Achieved) составляет 0,619 ($\gamma \geq 1$), а структурное сингулярное число (Peak mu-Value) составляет 0,618, что соответствует выполнения условия

$$\mu(F_L(P(j\omega), K(j\omega))) \leq 1 \quad (20)$$

то есть выполнение вышеприведенного условия гарантирует робастное качество замкнутой системе. Также выполняется условие (6), которое обеспечивает системе робастную устойчивость.

Сингулярные значения μ замкнутой системы, достигаемые регулятором после 3-й итерации, приведены на рис. 4, из которого видно, что синтезированный μ -регулятор обеспечивает при всех частотах $\omega \in [0, \infty]$ выполнения условия (20).

Полученный μ -регулятора скорости (Controller Order) является регулятором 30 порядка, который был редуцирован с помощью алгоритмов редуцирования в пакете Robust Control Toolbox \rightarrow H-infinity and Mu Synthesis в системе MATLAB до 4 порядка:

$$K_{\mu \text{ red}} = \frac{3,15 \cdot 10^4 s^3 + 5,32 \cdot 10^5 s^2}{s^4 + 2,26 \cdot 10^3 s^3 + 4,57 \cdot 10^5 s^2} \cdot \frac{3,25 \cdot 10^7 s + 6,25 \cdot 10^8}{+1,85 \cdot 10^8 s + 5,17 \cdot 10^7} \quad (21)$$

Частотные характеристики μ -регулятора полного порядка (Full order controller) и редуцированного (Reduced order controller) приведены на рис. 5.

На рис. 6 - рис. 8 представлены результаты работы электропривода с синтезированным μ -регулятором, редуцированным до 4-го порядка.

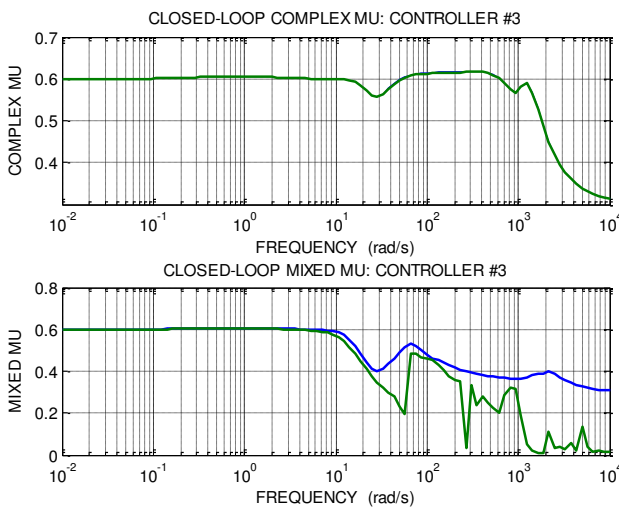


Рис. 4. Структурно сингулярные значения μ замкнутой системы

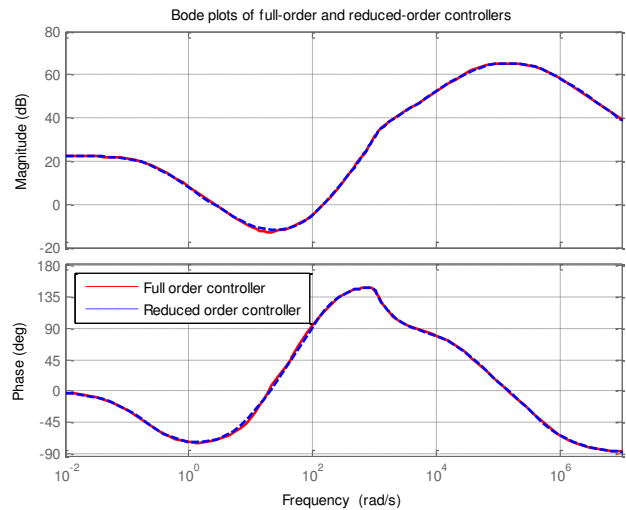


Рис. 5. Частотные характеристики μ -регуляторов полного порядка (30-го) (Full order controller) и редуцированного (4-го) (Reduced order controller)

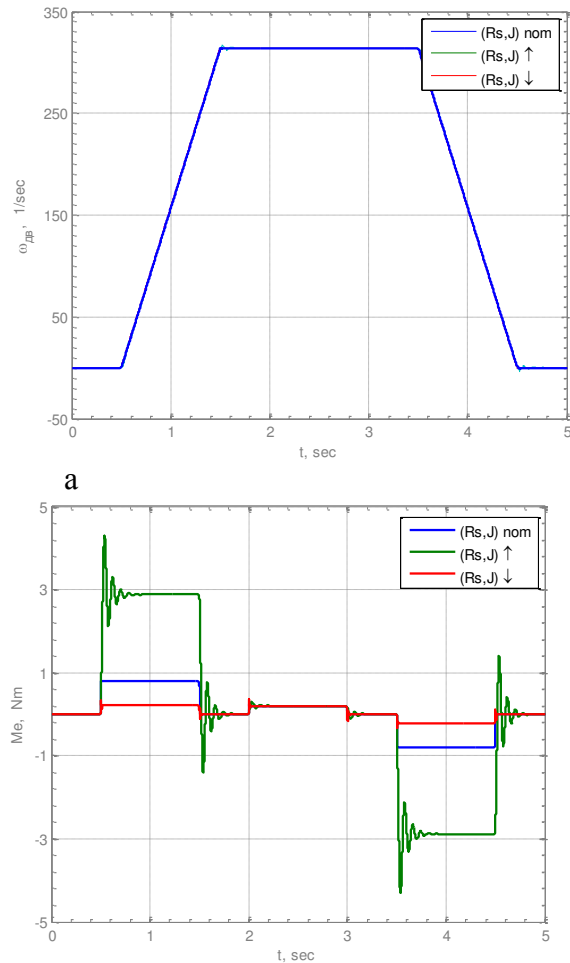


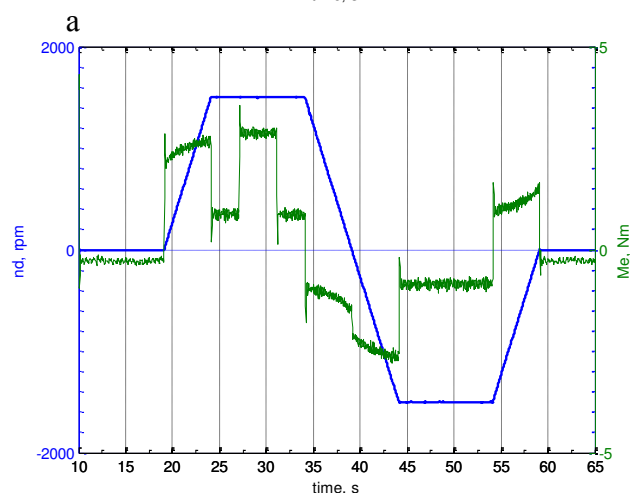
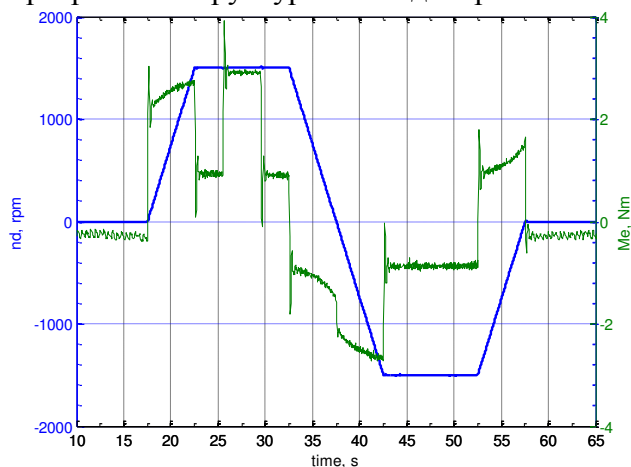
Рис. 6. Результаты моделирования робастной САР с μ -регулятором скорости при одновременном изменении J и R_s в 4 раза от номинальных параметров

Экспериментальные исследования.

Далее показана возможность практической реализации робастных алгоритмов управления СДПМ типа 1FT6044-1AF71-3DG1 и питания его от преобразователя частоты SINAMICS S120 [10, 11].

На рис. 7 представлены результаты работы электропривода с синтезированным μ -регулятором скорости при действии момента нагрузки (эксперимент проводился при изменении момента инерции).

Особенностью установки является возможность реализации алгоритмов управления в системе регулирования преобразователем практически любой сложности и исключительно на программном уровне, что стало возможным благодаря использованию системы MATLAB с входящими в её состав программой структурного моделирования



б

Рис. 7. Переходные процессы в системе с μ -регулятором скорости при уменьшении (а) и увеличении (б) момента инерции в два раза

динамических объектов Simulink и мастерских реального времени Real-Time Workshop и Real-Time Windows Target, в которых и создано программное обеспечение для управления ПЧ.

Отметим, что САР скорости СДПМ уже содержит внутренний контур регулирования q -составляющей статорного тока. В базовой прошивке преобразователя SINAMICS S120 этот контур реализован с пропорционально-интегральным регулятором. Изменить структуру этого регулятора, в том числе и алгоритмы переключения силовых ключей инверторной части доступными пользователю программными средствами не представляется возможным. Поэтому принято решение о реализации робастных алгоритмов лишь в канале регулирования скорости и/или внешнем технологическом регуляторе, в случае построения трёхконтурных САР, без изменения структуры регулятора q -составляющей статорного тока и алгоритмов переключения силовых ключей инверторного модуля.

Выводы. Синтезированный μ -регулятор скорости СДПМ в условиях неполной информации об объекте и с учетом его неопределенностей, обеспечивает системе управления робастные характеристики качества и заданную точность поддержания скорости. Разработаны программные коды (m-файлы) в системе MATLAB, позволяющие алгоритмизировать процедуру синтеза робастных САР для синхронного электропривода. Проведены экспериментальные исследования работы электропривода, которые подтверждают основные идеи, положенные в основу μ -синтеза и анализа.

Список использованной литературы

1. Doyle J., (1982), Analysis of Feedback System with Structured Uncertainties, *Control Theory and Applications, IEE Proc. Pt. D.* 129 (16), pp. 242 – 250.
2. Packard A., and Doyle J., (1993), The Complex Structured Singular Value, *Automatica*, Vol. 29, № 1, pp. 71 – 109.
3. Andre L. Tits, Yung-Shan Chou, (2000), On mixed- μ synthesis, *Automatica*, Vol. 36, pp. 1077 – 1079.
4. Поляк Б. Т. Робастная устойчивость и

управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. – 303 с.

5. Doyle J., Packard A., and Zhou K., (1991), Review of LFTs, LMIs, and μ , *Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control, IEEE, England, December 1991*, pp. 1227 – 1232.

6. Balas G.J., and Doyle J., (1994), Robust control of flexible modes in the controller crossover region, *AIAA Journal of Guidance, Dynamics and Control*, Vol. 17, № 2, pp. 370 – 377.

7. Полилов Е. В. μ -анализ и синтез робастной системы управления электропривода постоянного тока [Текст] / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленев, Е. С. Руднев // Вісник Кременчуцького державного технічного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 3/2009 (56) Ч. 2. – С. 25 – 30.

8. Полилов Е. В. Синтез робастного H_∞ -субоптимального регулятора положения позиционного электропривода [Текст] / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленев, Е. С. Руднев // Вісник Кременчуцького державного технічного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 3/2008 (50) Ч. 1. – С. 64 – 71.

9. Полилов Е. В. Робастное управление синхронным электроприводом на основе H_2 - и H_∞ -оптимизации [Текст] / Е. В. Полилов, Е. С. Руднев, С. П. Скорик // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 11 (186). – С. 305 – 314.

10. Разработка и практическая реализация робастных алгоритмов управления автоматизированным синхронным электроприводом на основе H_2 - и H_∞ -оптимизации [Текст] / Е. В. Полилов, А. И. Мотченко, Е. С. Руднев, С. П. Скорик, А. Г. Щелоков // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка. – 2011. – № 3 (79). – С. 60 – 69.

11. Практическая реализация и исследование робастных алгоритмов управления синхронным электроприводом [Текст] / Е. С. Руднев // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. – 2012. – Вип. 3 (19). – С. 102 – 107.

Получено 10.11.2015 г.

References

1. Doyle J., (1982), Analysis of Feedback System with Structured Uncertainties, *IEE Proc. Pt. D*. 129 (16), pp. 242 – 250 (In English).

url: http://control.ee.ethz.ch/~ifaatic/2014/references/Doyle_Control_Theory_and_Applications_IEE_Proceedings_D_1982.pdf

2. Packard A., and Doyle J., (1993), The Complex Structured Singular Value, *Automatica*, Vol. 29, № 1, pp. 71 – 109 (In English).

url: http://control.ee.ethz.ch/~ifaatic/2014/references/Packard_Automatica_1993.pdf

3. Andre L. Tits, Yung-Shan Chou, (2000), On mixed- μ synthesis, *Automatica*, Vol. 36, pp. 1077 – 1079 (In English).

4. Poljak B. T., and Shherbakov P. S. Robastnaja ustojchivost' i upravlenie [Robust stability and control] (2002), Moscow, Russian Federation, *Nauka*, 303 p. (In Russian).

5. Doyle J., Packard A., and Zhou K., (1991), Review of LFTs, LMIs, and μ , *Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control, IEEE, England, December 1991*, pp. 1227 – 1232 (In English).

6. Balas G.J., and Doyle J., (1994), Robust control of flexible modes in the controller crossover region, *AIAA Journal of Guidance, Dynamics and Control*, Vol. 17, № 2, pp. 370 – 377 (In English).

7. Polilov E. V., Zelenov A. B., and Rudnev E. S. μ -analiz i sintez robastnoj sistemy upravlenija elektroprivoda postojannogo toka [μ -analysis and synthesis of robust control system DC electric drives], (2009), *Visnik Kremen-chuc'kogo derzhavnogo tehničnogo uni-versitetu im. Mihajla Ostrograds'kogo*, Kremen-chuk, Ukraine, KDPU, Vip. 3/2009 (56) chastina 2, pp. 25 – 30 (In Russian).

8. Polilov E. V., Zelenov A. B., and Rudnev E. S. Sintez robastnogo H_∞ -suboptimal'nogo reguljatora polozhenija pozicionnogo elektroprivoda [Synthesis of robust H_∞ -suboptimal position controller position electric drive], (2008), *Visnik Kremen-chuc'kogo derzhavnogo tehničnogo uni-versitetu im. Mihajla Ostrograds'kogo*, Kremen-chuk, Ukraine, KDPU, Vip. 3/2009 (50) chastina 1, pp. 64 – 71 (In Russian).

9. Polilov E. V., Rudnev E. S., and Skorik S. P. Robastnoe upravlenie sinhronnym elektroprivodom na osnove H_2 - i H_∞ -optimizacii [Robust control of synchronous electric drive based H_2 - and H_∞ -optimization], (2011), *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu*, Donec'k, Ukraine, DonNTU, Vipusk 11 (186), pp. 305 – 314 (In Russian).

10. Polilov E. V., Motchenko A. I., Rudnev E. S., Skorik S. P., and Shhelokov A. G. Razrabotka i prakticheskaja realizacija robstnyh algoritmov upravlenija avtomatizirovannym sinhronnym elektroprivodom na osnove H_2 - i H_∞ -optimizacii [Development and implementation of robust control algorithms for automated synchronous electric drive based H_2 - and H_∞ -optimization], (2011), *Elektrotehnicni ta komp'juterni sistemi*, Kyiv, Ukraine, Tehnika, № 3 (79), pp. 60 – 69 (In Russian).

11. Rudnev E. S. Prakticheskaja realizacija i issledovanie robstnyh algoritmov upravlenija sinhronnym elektroprivodom [The practical implementation and research of robust control algorithms for synchronous electric drive], (2012), *Elektromehanichni i energozberigajuchi sistemi*, Kremenchuk, Ukraine, KrNU, vip. 3 (19), pp. 102 – 107 (In Russian).



Руднев
Евгений Сергеевич
к.т.н., доцент кафедры
автоматизированных
электромеханических
систем Донбасского гос-
ударственного техниче-
ского университета
(г. Лисичанск)

rudnev_evgen@mail.ru
моб.: (050) 682-38-58



Морозов
Дмитрий Иванович,
к.т.н., доцент заведующий
кафедры автоматизи-
рованных электrome-
ханических систем Дон-
басского государственно-
го технического универ-
ситета (г. Лисичанск)

dimorozov2@yandex.ua
моб.: (095) 849-11-73